

Eric Struyf¹, Patrick Meire¹, Stefan Van Damme¹ & Jack Middelburg²

¹ Universiteit Antwerpen, Departement Biologie,
Onderzoeksgroep Ecoysteembeheer
² Nederlands Instituut voor Ecologisch
Onderzoek, Centrum voor Estuariene en
Mariene Ecologie

Zoetwaterschorren als siliciumbuffers in het Schelde-estuarium

Zoetwaterschorren fungeren als buffers voor opgelost silicium in estuaria. Wanneer de concentraties aan opgelost Si (DSi) in het estuarium uitgeput dreigen te worden door de groei van diatomeeën, zullen schorren grote hoeveelheden DSi exporteren. Op deze manier dragen schorren bij tot de veerkracht van het estuarium om zelf om te springen met overvloedige nutriëntenvrachten. Een tekort aan silicium ten opzichte van de overvloedige, door de mens aangevoerde vrachten N (stikstof) en P (fosfor) kan immers leiden tot een verarmde structuur van de voedselketen, waarbinnen diatomeeën de belangrijkste trofische basis vormen. Het enorme potentieel van schorren om silicium op te slaan als biogeen Si, dat snel opnieuw in oplossing kan komen bij lage DSi-concentraties, vormt de basis voor deze buffercapaciteit. Een belangrijke rol is hierbij weggelegd voor rietvegetaties: in de zomermaanden vormt het rietstrooisel de belangrijkste bron van gerecycleerd opgelost Si. Deze resultaten tonen aan dat de heraanleg van getijgebonden overstromingsgebieden in sterke mate kan bijdragen tot een duurzaam beheer van estuaria.

Inleiding: het belang van Si in estuaria

Estuaria vormen de overgangszone tussen het mariene en het terrestrische milieu. Hun ecologische en economische betekenis is bijzonder groot. Estuaria herbergen immers een zeer grote biodiversiteit aan soorten en gemeenschappen. Deze biodiversiteit vormt de basis voor een belangrijk gedeelte van de visserijindustrie, die in estuaria en kustgebieden zijn voornaamste visgronden terugvindt, en zich voornamelijk richt op vissen en schaaldieren. Bovendien vormen estuaria vaak ook de toegangspoorten tot het binnenland: veel grote havens liggen dan ook aan estuaria.

Door hun ecologische complexiteit zijn estuaria echter ook kwetsbaar voor antropogene druk. De intensifiëring van de landbouw, de steeds toenemende vraag naar zoetwater, de vrijstelling van chemische componenten (nutriënten en toxicanten) in het systeem, de constructie van dammen, inpolderingen, baggerwerken...; wereldwijd ondergaan estuaria een zware menselijke druk (Kondratyev & Pozdnyakov 1996). Globale klimaatsverandering en de bijhorende temperatuursschommelingen en zeespiegelstijging dreigen deze menselijke druk nog te versterken.

Eén van de grootste problemen waarmee kustzones tijdens de afgelopen decennia werden geconfronteerd, is eutrofiëring. Eutrofiëring is eigenlijk het overvoeden van het ecosysteem: vanuit de landbouw, industrie en stedelijke agglomeraties worden grote hoeveelheden van de nutriënten stikstof (N) en fosfor (P) afgevoerd naar de waterlopen; deze vracht verzamelt zich uiteindelijk in estuaria, waar de concentraties van N en P nu tot twee grootteordes hoger zijn dan voor het optreden van deze menselijke belasting (Meybeck 1982). Als gevolg van de verhoogde nutriëntengehaltes is de potentiële groei van fytoplankton (eencellige algen) sterk toegenomen. Deze potentiële groeitoename is anders voor de verschillende fytoplankton groepen. Bijgevolg

verandert door eutrofiëring dan ook de verhouding waarin deze gemeenschappen voorkomen wat gevolgen kan hebben op het volledige voedselweb.

Primaire productie (productie door fotosynthese) van fytoplankton vormt de basis waarop de volledige estuariene voedselketen steunt. Dit betekent ook dat elke verandering in de verhouding waarin de verschillende fytoplanktongemeenschappen voorkomen, een effect kan hebben op de volledige werking van het estuariene ecosysteem. Eén fytoplanktongroep, de diatomeeën of kiezelwieren, is met name uiterst belangrijk voor het voedselweb. Transfer van organisch koolstof, vastgelegd door fytoplankton, via zoöplankton naar de hogere trofische (=voedings-) niveaus, zoals vissen en schaaldieren, is het efficiëntst voor organisch koolstof geproduceerd door diatomeeën. Diatomeeën vormen daarom de basis van de voedselpiramide in kustsystemen en oceanen (Sullivan & Moncreiff 1990).

In tegenstelling tot de andere fytoplanktongroepen hebben diatomeeën, naast N en P, ook een derde nutriënt, namelijk silicium, nodig om te overleven. Ze incorporeren silicium (Si) in een extern skelet, dat hen extra bescherming biedt tegen uitwendige invloeden. De menselijke toelevering van Si aan aquatische ecosystemen is echter gering. De verhouding waarin de nutriënten Si, N en P in estuaria voorkomen is daardoor sterk gewijzigd (Soetaert et al. 2005). Door de veranderde ratio tussen de basisnutriënten, kan een fenomeen optreden dat siliciumlimitatie wordt genoemd: de groei van diatomeeën wordt gestuit door een tekort aan silicium, hoewel N en P nog in grote hoeveelheden voorkomen (Schelske et al. 1983; Smayda 1997). Kiezelwierengemeenschappen, die onder natuurlijke omstandigheden een competitief voordeel hebben tegenover de andere fytoplanktongroepen (door een efficiënter energieverbruik en hogere fotosynthetische capaciteit), worden op grote schaal vervangen door "plaag-algen", waarvan *Phaeocystis* sp. (de schuimalg)

het bekendste voorbeeld is voor de Noordzeekust (Lancelot 1995). Deze algen worden "plaagalgen" genoemd, omdat hun extreme bloei ten koste van de kiezelwieren resulteert in een resem negatieve fenomenen: o.a. schuimvorming op de stranden, zuurstofloosheid van het water en toxische watermassa's. Doordat diatomeeën de basis vormen van de estuariene voedselketen, kan eutrofiëring en bijhorende siliciumlimitatie resulteren in het ineensinken van het volledige kustvoedselweb.

De nutriënten Si, N en P spelen dus alledrie een belangrijke rol in de problematiek van eutrofiëring. Toch was de afgelopen twee decennia voornamelijk de N- en P-cyclus in estuaria het onderwerp van grootschalige wetenschappelijke studies. Onderzoek naar de siliciumcyclus is tot op heden voornamelijk gericht op de oceanische cyclus; ook in mid-oceanische wateren zijn diatomeeën immers uiterst belangrijk als basis voor de voedselpiramide. Hoewel er de afgelopen jaren duidelijk een inhaalbeweging aan de gang is, werd de siliciumcyclus in estuaria gevoelig minder bestudeerd.

Onderzoek naar Si in estuaria heeft zich voornamelijk gericht op pelagische processen (d.i. processen in de rivierwaterkolom zelf). Tijdens het transport doorheen estuaria wordt opgelost Si (DSi) (H_4SiO_4) opgenomen door diatomeeën, en omgezet tot biogeen Si (BSi, amorf $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$). BSi kan tijdens het transport begraven worden in estuariene sedimenten, na afsterven en bezinken van kiezelwieren. Het transport van Si doorheen estuaria is van groot belang voor de siliciumcyclus in kust- en oceanische wateren. Naast de rol bij eutrofiëring van de kustwateren, is het getransporteerde silicium ook noodzakelijk om de oceanische Si-balans op peil te houden: hoewel oceanische diatomeeën bijzonder efficiënt het eigen BSi recycleren, gaat jaarlijks ongeveer 3% van de totale stock aan Si in oceanen verloren door begraving van BSi in diepzeesedimenten. Dit verlies wordt gecompenseerd door aanvoer uit estuaria (Conley 1997).

Het is bijzonder opvallend dat de rol van schor-gebieden (getijgebonden overstromingsgebieden die enkel overstroomd bij springtij) in de estuariene Si-cyclus nog nauwelijks of niet bestudeerd werd. Toch werden eind jaren '90 twee belangrijke aanwijzingen verzameld dat schorren wel degelijk een rol kunnen spelen in de estuariene siliciumcyclus. Een pionierstudie in North Carolina (USA) toonde aan dat het sediment en de vegetatie in schor-gebieden grote hoeveelheden BSi bevatten (Norris & Hackney 1999). Tijdens een uitwisselings-experiment langsheen de Zeeschelde (Van Damme et al. 1999) werd bovendien vastgesteld dat vanuit een zoetwaterschor belangrijke hoeveelheden DSi werden geëxporteerd naar het aangrenzende estuariene kanaal.

Doel van dit onderzoek (Struyf 2005a) was in detail de rol nagaan van zoetwaterschorren in de estuariene Si-cyclus, door het uitvoeren van uitwisselingsexperimenten van BSi en DSi tussen

schor en getijrivier, door het bepalen van Si-stocks in vegetatie, sediment en poriewater, en door na te gaan hoe snel DSi opnieuw wordt vrijgesteld na opname in vegetatie en sediment.

Studiegebieden

Het zoetwaterschor te Tielrode (ter hoogte van de monding van Durme in Schelde) werd tweemaandelijks bemonsterd op siliciuminhoud in sediment, vegetatie en poriewater. De bemonstering werd uitgevoerd in alle vegetatietypes die kenmerkend zijn voor dergelijke habitats: een zuivere rietvegetatie, een ruigtevegetatie (met voornamelijk brandnetel, reuzenbalsemien en wilgenroosje), een rietvegetatie met ruigte-invloeden en een wilgen-vloedbos.

In datzelfde zoetwaterschor werden, op een geïsoleerd deelgebied van 0.35 ha, uitwisselings-experimenten uitgevoerd die seizoenaal nagingen hoeveel BSi en DSi er elke tijcyclus worden uitgewisseld tussen het schor en de eigenlijke estuariene rivier. Hiertoe werd dit deelgebied met houten platen afgedamd, zodat water slechts kon in- en uitstromen via één enkele kreek. Gelijkaardige uitwisselingsexperimenten werden ter vergelijking uitgevoerd in een zoutwaterschor in Normandië. Zo konden we nagaan of zoetwater- en zoutwaterschorren gelijkaardig functioneren in de Si-cyclus (gebiedskaarten, zie Struyf et al. 2006a).

Hoe snel BSi in sediment wordt begraven, en hoe efficiënt het opnieuw wordt omgezet tot DSi, gingen we na in het zoetwaterschor "De Notelaar" nabij Steendorp. In dit schor zijn sedimentatie- en erosiepatronen tijdens recente studies immers zeer nauwkeurig in kaart gebracht (Temmerman et al. 2003, 2004). Tot slot lieten we riet in strooiselzakjes op een gecontroleerde wijze "verrotten" te Tielrode, om de snelheid waarmee rietgebonden BSi weer in oplossing komt te kwantificeren.

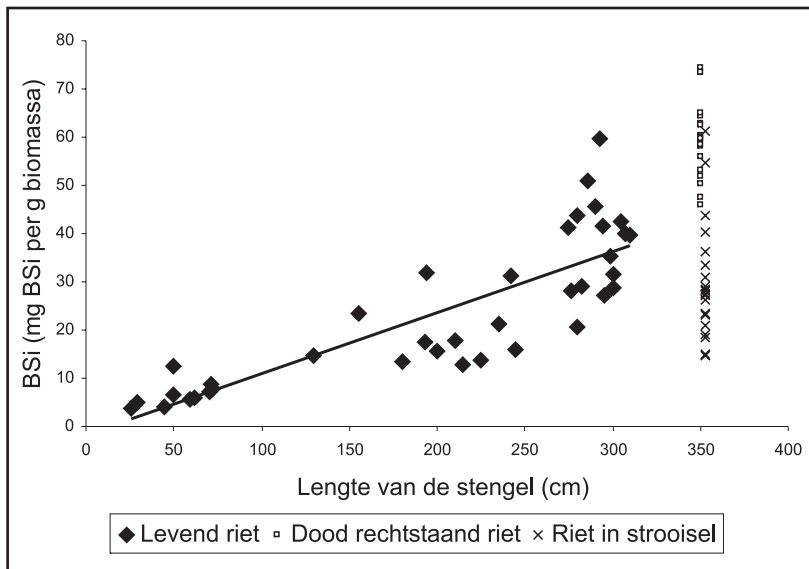
Siliciumopslagplaatsen

Naar Struyf et al. 2005c

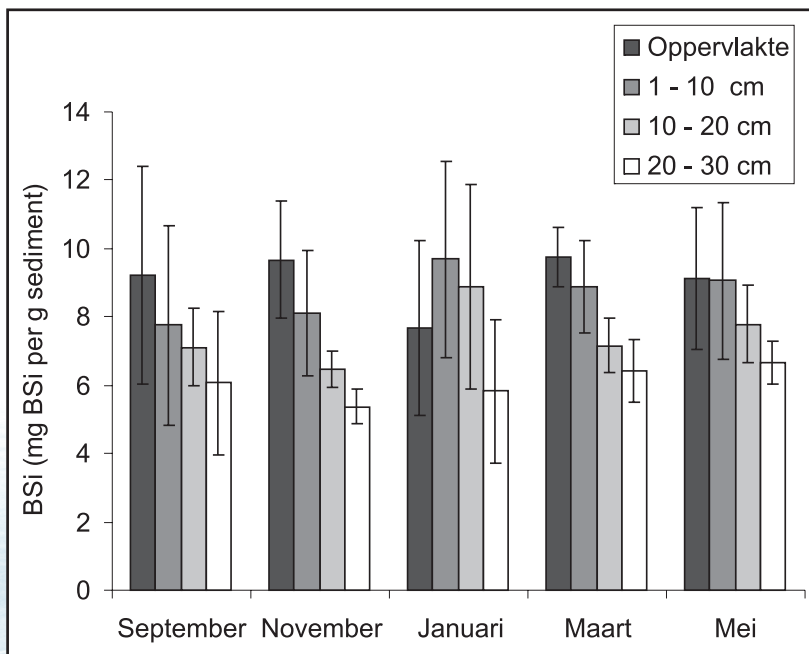
Vegetatie

Planten nemen opgelost silicium op via de wortels. Eenmaal het silicium is opgenomen door de plant, wordt het geïmmobiliseerd in zeer siliciumrijke structuren: fytolieten. De meeste planten kunnen overleven en reproduceren in een siliciumvrij milieu. Silicium is dus niet essentieel voor het overgrote deel van de plantenfamilies (de Paardestaarten vormen hierop de uitzondering, maar zij spelen geen rol in deze studie). Het vastleggen van Si kan een plant echter verschillende competitieve voordelen bezorgen t.o.v. andere individuen: een hogere weerstand tegen plantenziektes, tegen vraat door herbivoren en tegen metaaltoxiciteit en een verhoogde stevigheid zijn slechts enkele van de gekende voordelen.

Figuur 1 De siliciuminhoud doorheen de levenscyclus van rietstengels in het Tielrode-zoetwaterschor. De lengte wordt hier gebruikt als ouderdomsindicator. Dode rietstengels en strooisel kregen een virtuele lengte die hoger lag dan de hoogste waargenomen lengte in de levende stengels, om hun plaats verder in de levenscyclus te symboliseren. (de aangegeven lineaire toename van BSi met lengte in levende rietstengels is significant met $p < 0.00001$)



Figuur 2 De BSi-inhoud (2003,2004) van de sedimenten in het Tielrode zoetwaterschor, uitgemiddeld over de verschillende vegetatietypes (foutenvlag is een maat voor de variatie tussen deze vegetatietypes). Er is een duidelijke dieptegradiënt waarneembaar, met lagere BSi-gehalten in de diepere sedimenten. Er is geen duidelijk seizoenaal patroon.



In schorvegetatie werden de hoogste BSi-concentraties teruggevonden in riet. Dit vertaalt zich ook in de bijdrage van riet tot de totale BSi-inhoud teruggevonden in alle vegetatie in het studiegebied: 96 % van het plantgebonden BSi bevindt zich in de rietvegetatie. De totale hoeveelheid BSi in de andere plantensoorten is zo minniem in verhouding tot het riet, dat ze bij verdere analyse buiten beschouwing kunnen worden ge-

laten. Riet accumuleert silicium tijdens zijn groei: hogere siliciumconcentraties worden teruggevonden in de langst levende planten, op het hoogtepunt van het groeiseizoen (Figuur 1). Nadat een rietstengel afsterft, kan hij toch nog een hele periode blijven rechtstaan. In deze dode rechtopstaande stengels worden de hoogste BSi-gehalten teruggevonden (Figuur 1). Stikstof, koolstof en fosfor komen immers door bacteriële werking reeds vrij uit deze dode, maar staande stengels. Hierdoor neemt de relatieve siliciuminhoud toe. Eenmaal een dode rietstengel neervalt (bv. door de werking van wind of water), komt ook het biogeen Si in oplossing, en dit vertaalt zich in lagere BSi-concentraties in rietstrooisel op de schorbodem.

Sediment en poriewater

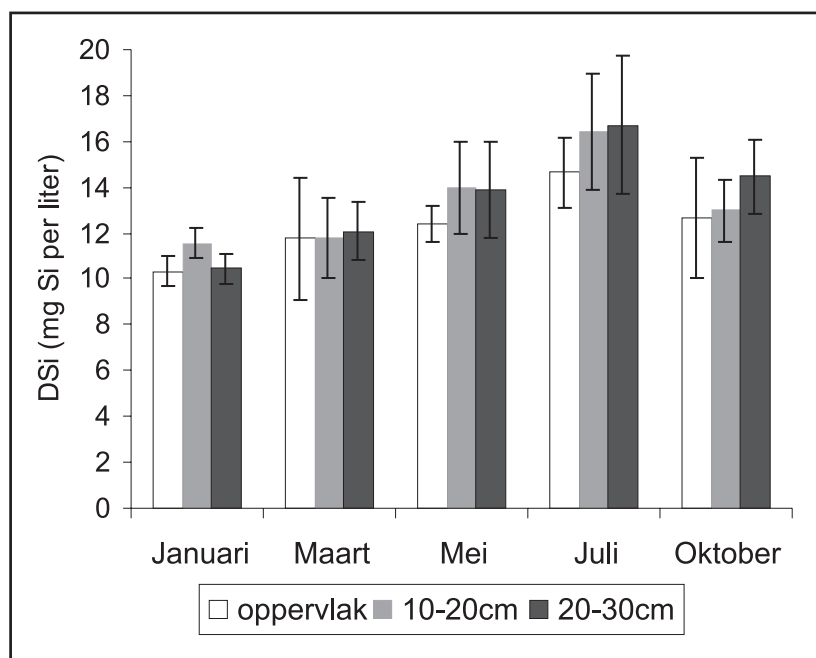
Er zijn verschillende potentiële bronnen van BSi voor schorsedimenten. Bij hoogtij wordt samen met water ook heel wat zwevend materiaal (niet-opgeloste stoffen, zoals sediment, dood en levend fytoplankton, plantenmateriaal) ingevoerd. Een deel van dit materiaal sedimenteert op het schoroppervlak; samen met het organisch materiaal wordt ook biogeen Si geïmporteerd. Een andere mogelijke bron van BSi in sedimenten wordt gevormd door de rietfytolieten, die samen met het strooisel kunnen worden begraven onder gesedimenteerd zwevend materiaal. Decompositie-experimenten hebben echter uitgewezen dat in de Schelde-zoetwaterschors, al het BSi uit het strooisel in oplossing komt en dus niet begraven wordt (zie verder).

De BSi-inhoud van het sediment was niet significant verschillend voor de verschillende vegetatietypes. Er werd ook geen seizoenaal patroon teruggevonden: het hele jaar door vertoonden de verschillende schorsedimenten gelijkaardige BSi-concentraties. Belangrijker was echter de dieptegradiënt die werd teruggevonden: biogeen siliciumconcentraties in de sedimenten nemen af naarmate de diepte toeneemt (Figuur 2). Dit betekent dat oudere sedimenten, die nu begraven liggen onder later gesedimenteerd materiaal, de kleinste hoeveelheid BSi bevatten. Dit duidt op geleidelijke vrijstelling van BSi uit het schorsediment.

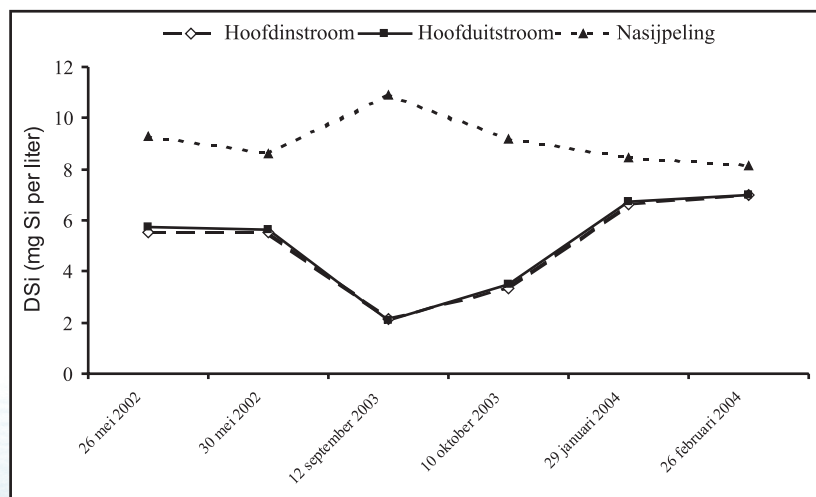
Het BSi in het sediment komt geleidelijk in oplossing als DSi in het poriewater. Hierdoor zijn de concentraties opgelost Si in zoetwaterschor poriewater een stuk hoger dan de concentraties in het pelagisch milieu. Poriewater DSi-concentraties zijn het hoogst in de zomer-, en het laagst in de winter (Figuur 3). Oplossingsprocessen verlopen immers sneller bij hogere temperatuur en bij hogere biologische activiteit: in de zomer dus.

In schorsedimenten zit ook nog een grote hoeveelheid niet-biogeen Si vervaardigd in de kleimineralen als zogenaamde silicaten. Deze vaste siliciumvorm komt echter vele duizenden malen minder snel in oplossing dan het biogeen Si. In schorsen zit zoveel BSi, en de reactiviteit van mineraal Si is zo laag, dat we de reacties van het Si in de klei-

Figuur 3 DSi-concentraties (2004) in het poriewater van het Tielrode zoetwaterschor, uitgemiddeld over de verschillende vegetatietypes (foutenlag is een maat voor de variatie tussen deze vegetatietypes). De hoogste concentraties werden waargenomen in de zomer, de laagste in de winter. Er was geen duidelijke dieptegradiënt waarneembaar.



Figuur 4 Gemiddelde DSi-concentraties in hoofdstroom, hoofd-uitstroom en nasijpelingswater (verklaring termen zie tekst) te Tielrode gedurende zes tijdcycli. Er is nagenoeg geen verschil tussen hoofdstroom en -uitstroom. De concentraties in nasijpelingswater zijn sterk verhoogd. De relatieve aanrijking in de nasijpeling is het hoogst in de zomermaanden.



mineralen als irrelevant kunnen beschouwen voor dit onderzoek.

Siliciumreserves

Samenvattend kunnen we zeker stellen dat schorren eigenlijk bijzonder rijke siliciumreservoirs zijn binnen het estuariene ecosysteem. De totale hoeveelheid BSi, opgeslagen in alle schorren langsheen het zoete gedeelte van het Schelde-estuarium, loopt op tot meer dan 5000 ton Si. Hiervan zit slechts 150 ton, of 3% in de vegetatie. Sedimenten zijn met voorsprong de grootste BSi-reservoirs in de zoetwaterschorgebieden.

Deze 5000 ton BSi is ongeveer even veel als de totale hoeveelheid Si die in opgeloste vorm jaarlijks doorheen dit gedeelte van het estuarium stroomt. Door de frequente overstromingen, zijn schorren nauw verbonden met het pelagische milieu: tot DSi opgelost BSi kan gemakkelijk uitgewisseld worden met overstromingswater tijdens hoogtij. Bovendien komt BSi relatief snel in oplossing, wanneer het in aanraking komt met water met lage opgeloste siliciumconcentraties. Schorren hebben dus duidelijk een sterk potentieel als siliciumreserve binnen het estuarium wanneer, door groei van diatomeeën, de concentraties aan opgelost Si limiterend dreigen te worden.

Een buffer tegen limitering

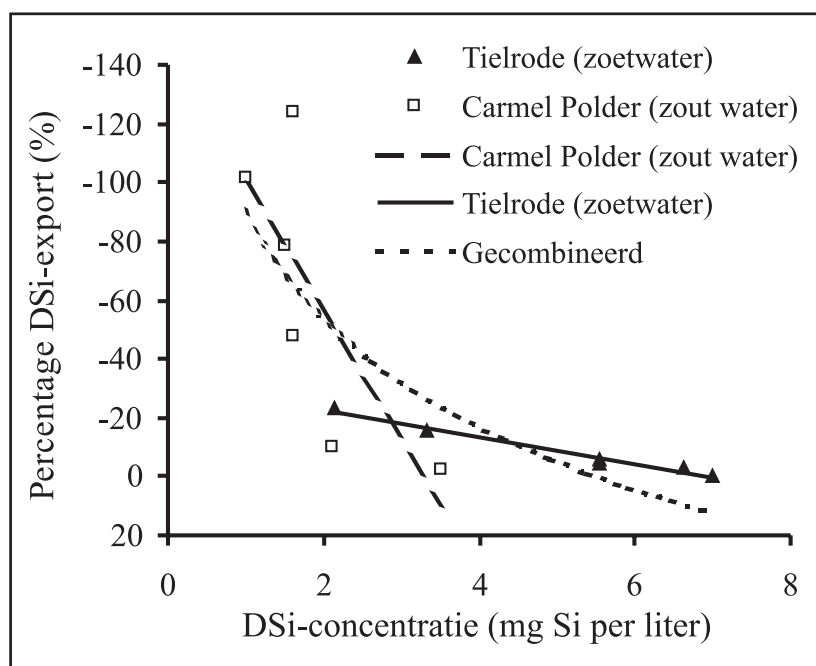
Naar Struyf et al. 2005b, Struyf et al. 2006a

Onze uitwisselingsexperimenten toonden aan dat het zoetwaterschor te Tielrode enerzijds biogeen Si importeert, en anderzijds opgelost Si exporteert. De import van biogeen Si was zoals verwacht nauw gecorreleerd met de import van zwevend materiaal. De export van DSi was voornamelijk te wijten aan sterk verhoogde siliciumconcentraties in het "nasijpelingswater" (Figuur 4).

Dit nasijpelingswater is het resterende overstromingswater, dat tussen twee overstromingen in kleine volumes uit het schor stroomt. Omstreeks de hoogste waterstand in de rivier, komt water in grote volumes het schor binnengestroomd (+/- 80 minuten lang), waarna in de onmiddellijk daaropvolgende 2 uur het overgrote deel van het overstromingswater weer wegstroomt, doordat de waterstand in de rivier tijdens het ebgetij weer daalt. Dit is de hoofdoverstromingsperiode, en de netto uitwisseling van DSi tijdens deze periode is gering. Tussen twee hoofdoverstromingen door vloeit het overgebleven water weg als nasijpelingswater. Hoewel het volume nasijpeling klein is t.o.v. de totaal uitgewisselde volumes water (ca. 60 m³ elk getij op een totaal van gemiddeld 1500 m³), is de aanrijking aan DSi zo sterk, dat er een significante export uit resulteert.

Waarom is dit nasijpelingswater zo sterk aangerijkt aan DSi? In de vorige paragraaf werd getoond dat schorren grote hoeveelheden BSi bevatten, die langzaam als DSi oplossen in het poriewater. Hierdoor is het poriewater rijker aan DSi dan het overstromingswater. Het nasijpelingswater is eigenlijk water, dat tijdens de overstromingsperiode in de sedimenten is binnengedrongen, en zich vermengd heeft met het poriewater. Het effect is tweeledig: enerzijds stroomt sterk aan silicium aangerijkt water het schor uit, terwijl anderzijds de DSi concentraties in het poriewater verdunnen, en nieuw BSi uit sediment en strooisel in oplossing kan komen. Bij elk getij waarbij het schor overstroomt, wordt aldus een deel van het opgeslagen biogeen Si gerecycleerd tot opgelost Si en geëxporteerd.

Figuur 5: De relatie tussen concentratie aan DSi in het overstromingswater enerzijds, en de relatieve export van DSi anderzijds. Zowel voor zoetwater als voor zout water stijgt de export met dalende overstromingsconcentraties.



In de zomer, wanneer diatomeeënpopulaties tot bloei komen in het estuarium, wordt de concentratie aan DSi in het overstromingswater gevoelig lager. Diatomeeën nemen het opgelost Si immers op tijdens hun groei. Doordat de concentraties in het overstromingswater lager zijn, wordt de relatieve aanrijking van het nasijpelingswater hoger. De relatieve export van DSi uit het schor is daarom het hoogst bij lage DSi-concentraties in het estuarium. Een gelijkaardig resultaat werd ook vastgesteld in een zoutwaterschor te Normandië. Voor allebei de gebieden geldt dat de schorren meer silicium naleveren aan het estuarium, naarmate diatomeeën de siliciumconcentraties meer uitputten (Figuur 5).

Deze resultaten geven aan dat de schorren een zeer belangrijke rol kunnen spelen in de estuariene siliciumcyclus. Ze vormen als het ware een buffer tegen siliciumlimitatie, en alle daarmee verbonden negatieve effecten. De schorren zullen immers zeer grote hoeveelheden DSi exporteren wanneer kiezelwieren het beschikbare silicium dreigen uit te putten. Een extrapolatie van de resultaten geeft het belang tijdens bloeiperiodes duidelijk aan:

- de resultaten geven aan dat tijdens kiezelwierbloeiperiodes, de export van DSi uit zoetwaterschorren kan oplopen tot 400 mg per m² per tiencyclus. Elke tiencyclus exporteert het totaal oppervlak aan zoetwaterschorren langs de Schelde (450 ha) dan tot 1.8 ton DSi.
- In zomermaanden met sterke diatomeeënbloei kan de DSi-vracht in het zoete estuarium dalen tot minder dan 10 ton DSi per maand
- Dit betekent dat tijdens een bloeimaand in zes tiencycli even veel DSi wordt gerecycleerd in schorren, als de totale hoeveelheid DSi die gedurende

rende die maand werd afgevoerd doorheen de Zeeschelde.

Deze extrapolatie toont duidelijk dat de silicium-recyclage in schorren bijdraagt aan de zelfzuiverende capaciteit van het estuarium. Een verhoogde siliciumexport uit schorren kan de verhoogde N- en P- vrachten, door de mens in het systeem gebracht, compenseren en alzo de Si:N:P-ratio op een gezond peil houden.

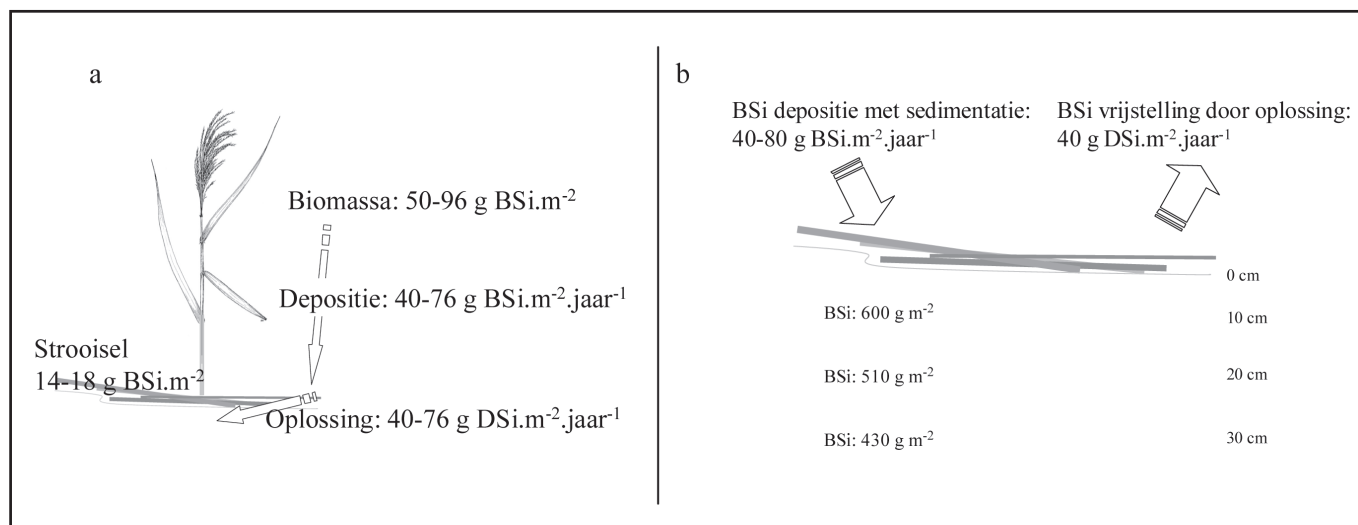
Snelle en trage recyclage

Naar Struyf et al. 2006b, Struyf et al. 2005a

Hoewel er veel meer silicium als BSi is opgeslagen in sedimenten dan in vegetatie, dragen beide compartimenten in gelijke mate bij tot de bufferfunctie van zoetwaterschorren in de estuariene siliciumcyclus. Dit opmerkelijke resultaat is te verklaren door de zeer snelle vrijstelling van rietgebonden BSi eenmaal een rietstengel omvalt. Per jaar wordt uit rietvegetatie tussen 40 en 80 g DSi vrijgesteld per vierkante meter (Figuur 6a). Dit betekent om en bij de 90 % recyclage van het BSi bovengronds opgeslagen in riet op het top punt van het groeiseizoen. Deze vrijstelling geschiedt voornamelijk door oplossing naar oppervlakkig bodemwater. Natuurlijk neemt het riet dit DSi ook op uit het poriewater. Deze opname gebeurt echter voornamelijk in het voorjaar en de vroege zomer, wanneer de groei het sterkst is. Voornamelijk in de zomer wordt de recyclage belangrijk, doordat DSi-concentraties in het estuarium sterk afnemen. Dan draagt de aanwezigheid van een snel ontbindende siliciumrijke rietstrooisellaag sterk bij tot de bufferende werking van de schorren binnen de estuariene siliciumcyclus.

In tegenstelling tot de zeer snelle recyclage van vegetatiegebonden BSi, verloopt de vrijstelling van DSi uit het sediment relatief traag. Sedimenten stellen jaarlijks ongeveer 40 g DSi vrij per vierkante meter, onafhankelijk van het vegetatietype. Een belangrijk verschil met het rietgebonden BSi is dat het sedimentgebonden BSi niet volledig wordt gerecycleerd (Figuur 6b). Het percentage recyclage is afhankelijk van het ontwikkelingsstadium waarin het schor zich bevindt. Jonge schorren zijn meestal nog zeer laaggelegen, en sedimenteren zeer snel op. In dit ontwikkelingsstadium is de recyclage bijzonder inefficiënt: meer dan 80 % van het BSi, geïmporteerd met zwevend materiaal, wordt definitief begraven in het sediment (dit betekent dat het op een diepte komt waar het niet meer beschikbaar is voor export samen met het nasijpelingswater). Door de snelle sedimentatie hoogt een jong schor snel op, de overstromingsfrequenties en -volumes worden geleidelijk lager, en de sedimentatie neemt af. Schorren evolueren alzo naar een hoogteligging in evenwicht met de gemiddelde hoogwaterlijn. In een zoetwaterschor in dit laatste ontwikkelingsstadium wordt in 35 jaar tijd ongeveer 60 % van het geïmporteerde BSi gerecycleerd.

Figuur 6 Opslag en recyclage van Si in riet (links, a) en sediment (rechts, b). In sediment neemt de BSi-inhoud af met de diepte. Het gehalte aan BSi is veel kleiner in de biomassa dan in de sedimenten. Toch komt jaarlijks minstens evenveel DSi in oplossing per oppervlakte-eenheid uit de strooisellaag dan de sedimenten. De biomassa siliciuminhoud voor strooisel en biomassa is aangegeven voor het vegetatieve hoogseizoen. De strooisellaag is een overgangsfase tussen BSi en DSi, met een korte residentietijd (continue vervanging van opgelost BSi met nieuw gedeponiseerd BSi).



De verblijftijd van sedimentgebonden BSi in het schor is dus duidelijk veel langer dan vegetatiegebonden BSi (35 jaar tegenover 1 jaar). Bovendien is de recyclage vanuit sedimenten niet volledig: een deel van het BSi wordt begraven in de bodem en wordt biologisch onbeschikbaar.

Conclusie

Met deze resultaten werd een eerder geformuleerde, maar nooit proefondervindelijk aangetoonde hypothese (Hackney et al. 2000) bevestigd: de intense Si-cyclering in schorren en daarbij horende verhoogde DSi-beschikbaarheid versterkt de basis waarop de estuariene voedselpiramide steunt. Op deze manier draagt de intense Si-cyclus in schorgebieden ook bij tot de eerder vastgestelde relatie tussen oppervlakte schorhabitat langs een estuarium enerzijds, en estuariene productiviteit van economisch relevante soorten (vissen, schaaldieren) anderzijds.

Algemeen kunnen we stellen dat N, P en Si-cyclering in schorren elk op zich bijdragen tot deze relatie. Anorganisch N en P worden in opgeloste vorm ingevoerd in de schorgebieden, waar ze aan de basis liggen van een sterke verhoogde primaire productiviteit. De geproduceerde biomassa is als het ware de levensenergie van het estuarium. De rol van silicium in deze relatie tussen schoroppervlak en systeemproductiviteit is enigszins anders. Si wordt geïmporteerd in organische vorm, en in zijn opgeloste vorm weer vrijgesteld. Het opgeloste Si zorgt voor het behoud van de balans in de voedselpiramide: een tekort aan silicium zou immers zorgen voor het wegvallen van de optimale fytoplanktonbasis.

Ten dele op basis van deze studie werd het beoogde te herstellen schoroppervlak vastgelegd in "instandhoudingsdoelstellingen" (IHD's) voor de Zeeschelde (Adriaensen et al. 2005). Deze IHD's

beogen een duurzaam gebruik van het estuarium door alle sectoren binnen de samenleving (economie, ecologie, individuen,...), opdat haar waarde behouden blijft voor toekomstige generaties. De IHD's streven dus naar een optimaal ecologisch functioneren van het Schelde-ecosysteem, zonder daarbij andere belangrijke functies als transport en economische ontwikkeling uit het oog te verliezen. Belangrijker nog is dat deze resultaten eens te meer aangeven hoe essentieel herintegratie van getijdegebonden overstromingsgebieden in sterk antropogeen beïnvloede estuaria is. De overstromingsgebieden verhogen immers de weerstand van het estuariene systeem tegen negatieve menselijke invloeden (vb. eutrofiëring), en door hun functie van natuurlijke waterzuiveringsstations verhogen zij de leefbaarheid van volledige kustgebieden.

Dankwoord

Dit onderzoek werd mogelijk gemaakt door de financiering van FWO (Fonds voor Wetenschappelijk Onderzoek, Vlaanderen), NWO (Nederlandse Organisatie voor Wetenschappelijk Onderzoek), FWO-NWO VLANEZO (Vlaams-Nederlandse samenwerking in zeegebonden kustonderzoek), IWT (Instituut voor de Aanmoediging van Innovatie door Wetenschap en Technologie in Vlaanderen) en de Vlaamse Gemeenschap, Administratie Waterwegen en Zeewezen en nv Waterwegen en Zeekanaal. De analyses werden uitgevoerd in het "Beproevingslaboratorium voor Chemische Waterkwaliteit, Universiteit Antwerpen, departement Biologie", door Lieve Clement en Eva De Bruyn.

Referenties

- Adriaensen F, Van Damme S, Van den Bergh E, Brys R, Cox T, Jacobs S, Konings P, Maes J, Maris T, Mertens W, Nachtergale L, Struyf E, Van Braeckel A, Van Hove D, Meire P (2005). Instandhoudingsdoelstellingen Schelde-estuarium, Universiteit Antwerpen, Rapport ECOBE 05R.82, Antwerpen.
- Conley DJ (1997) Riverine contribution of biogenic silica to the oceanic silica budget. *Limnology & Oceanography* 42: 774-777
- Hackney CT, Cahoon LB, Prestos C & Norris A (2000) Silicon is the link between tidal marshes and estuarine fisheries: a new paradigm. In: Weinstein MP & Kreeger DA (eds) Concepts and controversies in tidal marsh ecology, pp 543-552, Kluwer Academic Publishers, London
- Kondratyev KY, Pozdnyakov DV (1996) Land-ocean interactions in the coastal zone: the LOICZ project. *Il Nuovo Cimento* 19: 339-354
- Lancelot C (1995) The mucilage phenomenon in the continental coastal waters of the North-Sea. *Science of the Total Environment* 165 : 83-102
- Meybeck M (1982) Carbon, nitrogen and phosphorus transport by world rivers. *American Journal of Science* 282: 401-450
- Norris AR, Hackney CT (1999) Silica content of a mesohaline tidal marsh in North Carolina. *Estuarine, Coastal & Shelf Science* 49: 597-605
- Schelske CL, Stoermer EF, Conley DJ, Robbins JA, Glover RM (1983) Early eutrophication in the lower Great Lakes: new evidence from biogenic silica in sediments. *Science* 222: 320-322
- Smayda TJ (1997) Bloom dynamics: physiology, behavior, tropic effects. *Limnology & Oceanography* 42: 1132-1136
- Soetaert K, Middelburg JJ, Heip C, Meire P, Van Damme S, Maris T (2005) Long-term change in dissolved organic nutrients in the heterotrophic Scheldt estuary (Belgium, the Netherlands). *Limnology & Oceanography* 51 (1/2): 409-423
- Struyf E. (2005a) De rol van zoetwaterschorren in de estuariene siliciumcyclus (Schelde-estuarium). Licentiaatsthesis, Universiteit Antwerpen.
- Struyf E, Van Damme S, Gribsholt B & Meire P (2005b) Freshwater marshes as dissolved silica recyclers in an estuarine environment (Schelde estuary, Belgium). *Hydrobiologia*, 540, 69-77.
- Struyf E, Van Damme S, Gribsholt B, Middelburg JJ & Meire P (2005c) Biogenic silica in freshwater marsh sediments and vegetation. *Marine Ecology Progress Series*, 303, 51-60.
- Struyf E, Dausse A, Van Damme S, Bal K, Gribsholt B, Boschker HTS, Middelburg JJ & Meire P (2006a) Tidal marshes and biogenic silica recycling at the land-sea interface. *Limnology & Oceanography*, 51(2), 838-846
- Struyf E., Temmerman S. & Meire P. (2006b) Dynamics of biogenic Si in freshwater tidal marshes: Si generation and retention in marsh sediments (Scheldt estuary). *Biogeochemistry*, published online.
- Sullivan MJ, Moncreiff CA (1990) Edaphic algae are an important component of salt marsh food webs: evidence from multiple stable isotope analyses. *Marine Ecology Progress Series* 62: 149-159
- Temmerman S, Govers G, Meire P and Wartel S (2003) Modelling long-term tidal marsh growth under changing tidal conditions and suspended sediment concentrations, Scheldt estuary, Belgium. *Marine Geology* 193: 151-169
- Temmerman S, Govers G, Wartel S and Meire P (2004) Modelling estuarine variations in tidal marsh sedimentation: response to changing sea level and suspended sediment concentrations. *Marine Geology* 212: 1-19
- Van Damme S, Ysebaert T, Meire P, Van den Bergh E (1998) Onderzoek milieu-effecten Sigmaplan (OMES): denitrificatie, verslag AMIS DS 7.4, studie in opdracht van het Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap, Vlaamse Milieumaatschappij, Bestuur Meetnetten en Onderzoek. Universiteit Gent, Laboratorium voor Toegepaste Analytische en Fysische Chemie, Gent

Eric Struyf ¹, Patrick Meire ¹,
Stefan Van Damme¹ & Jack Middelburg ²

¹ Universiteit Antwerpen, Departement Biologie, Onderzoeksgroep Ecoysteembeheer. Universiteitsplein 1c, 2610 Wilrijk, België

² Nederlands Instituut voor Ecologisch Onderzoek, Centrum voor Estuariene en Mariene Ecologie, PO BOX 140, 4400 AC Yerseke, Nederland

Correspondentie-auteur:

Eric Struyf
Post-doc onderzoeker
Universiteit Antwerpen, Departement Biologie, Onderzoeksgroep Ecoysteembeheer.
Universiteitsplein 1c, 2610 Wilrijk, België
Tel.: 03/8202278 Fax: 03/8202271
eric.struyf@ua.ac.be